基于 SLA 制备的八面体点阵结构力学性能研究

徐香新

（东北大学理学院，110819 沈阳）

摘　要：基于 SLA 3D 打印技术，利用 V5 韧性树脂制备了相对密度分别为 11.3%、19.5%、24% 和 27.9% 的八面体点阵结构，并将八面体点阵结构进行紫外固化处理。通过压缩试验测试八面体点阵结构固化前后的力学性能。研究结果表明：八面体点阵结构的压缩模量、抗压强度、单位吸收能、量纲归一化刚度以及量纲归一化强度均随着相对密度的增大而提高；相对密度从 11.3% 提升至 27.9%，非固化与固化八面体点阵结构的压缩模量约上升了 3.5 倍左右，抗压强度约上升了 3 倍左右；在相同相对密度下，固化后的八面体点阵结构压缩模量及抗压强度更高，固化后压缩模量约是非固化的 4 倍，抗压强度约是非固化的 5 倍；随着相对密度的增大，固化后八面体点阵结构的单位吸收能上升趋势均要优于非固化的八面体点阵结构。

关键词：八面体；点阵结构；光敏树脂；SLA；力学性能

中图分类号：TB322　　　　**文献标志码：**A

Study on mechanical properties of octet-truss lattice prepared by SLA

XU Xiangxin

（College of sciences，Northeastern University，110819 Shenyang，China）

Abstract： Based on SLA 3D printing technology，octet-truss lattices with relative densities of 11.3%，19.5%，24% and 27.9% were prepared by using V5 tough resin，and the octet-truss lattices was cured by UV. The mechanical properties of octet-truss lattices before and after curing were tested by compression test. The results show that the compressive modulus，compressive strength，unit absorption energy，normalized stiffness，and normalized strength of octet-truss lattices increased with the increase of relative density. The relative density increased from 11.3% to 27.9%. The compressive modulus and compressive strength of the non-cured and cured octahedral lattice structure increased about 3.5 times and 3 times，respectively. At the same relative density，the compressive modulus and compressive strength of the cured octet-truss lattices were higher. The compressive modulus of cured octet-truss lattices was about 4 times that of the uncured，and the compressive strength was about 5 times of that of the uncured. With the increase of relative density，the unit absorption energy of cured octet-truss lattices was better than that of uncured octet-truss lattices.

Key words： octet；lattice；photopolymer resin；SLA；mechanical property

收稿日期：2020-09-28　　　　**修回日期：**2021-12-16

基金项目：中央高校基本科研业务费资助项目（No. 02060032119012）

作者简介：徐香新，实验师。E-mail：xiangxin0424@163.com

引用格式：徐香新. 基于 SLA 制备的八面体点阵结构力学性能研究[J]. 应用力学学报，2022，39(1)：163-168.

XU Xiangxin. Study on mechanical properties of octet-truss lattice prepared by SLA[J]. Chinese journal of applied mechanics，2022，39(1)：163-168.

点阵结构的概念最早由麻省理工学院的 Gibson 以及剑桥大学的 Ashby 等提出[1]，经过国内外多年的研究发展[2-5]，点阵结构凭借其低质量、低密度、高强度、超吸能等优质特点，已广泛应用于航空航天、车辆船舶、海洋工程等领域[6-8]。3D 打印技术的飞速发展促进了点阵结构的发展及应用，《中国制造2025》更是将 3D 打印技术视为关键核心技术[9]，研究利用 3D 打印技术制备的点阵结构已成为当今时代的热门领域。

国内外诸多学者对利用 3D 打印技术制备的点阵结构进行了深入研究。Ye 等[10] 利用聚乳酸纤维通过 3D 技术制备了金字塔型的点阵结构，通过数值模拟以及试样测试的方法分析了其力学性能。数值模拟以及试验结果均表明该结构具有良好的吸能性。丁莉等[11] 利用光固化树脂设计了双锥构型三维点阵结构，并对其进行了压缩试验测试，得到了点阵材料的元胞尺寸对材料压缩性能影响显著等结论。于天彪等[12] 利用光固化后的 Vero White 型光敏树脂进行建模，并通过数值模拟以及试验手段，分析了多孔结构不同孔隙率的力学性能。研究结果表明随着孔隙率的提高，结构的抗压强度随之下降。高东明等[13] 通过 3D 打印技术，建立了泡孔空间点阵模型，并通过试验测试了其力学性能。试验结果表明，在具有相同的表观密度时，随着孔隙率的增大，体心立方和正方结构的弹性模量相对面心立方结构下降更为明显。顾晓春等[14] 考虑了 3D 打印工艺上的缺陷，分析了点阵结构中存在缺陷时的力学性能，并给出了中心部位杆件缺失数量与结构力学性能之间的关系表达式。

本文采用 Formlabs 公司生产的 V5(Tough) 韧性光敏树脂作为打印材料。V5 韧性光敏树脂相比其他标准树脂具有在具备可承载高应力的同时，还能保证良好的延展性的优点，在吸能护具、零件加工、模型设计等领域均有应用。通过 Form2-SLA 3D 打印机建立相对密度分别为 11.3%、19.5%、4% 和 27.9% 的八面体点阵结构，并利用紫外线交联对八面体点阵结构进行固化。通过单轴压缩的试验方法，分析比对八面体点阵结构固化前后的力学性能。

1 八面体点阵结构设计及制备

1.1 胞元结构设计

本文研究目前工程中应用较为广泛的八面体点阵结构，八面体点阵结构单胞示意图如图 1 所示。每个结点处连接 12 个杆单元，每个杆单元的尺寸相同，每个杆单元均为方截面，截面边长为 1.414 mm。

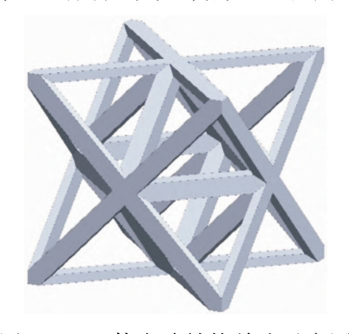


图 1 八面体点阵结构单胞示意图

Fig. 1 Octet-truss lattice unit cell

1.2 基体材料测试

本文八面体点阵结构由 Formlabs 公司生产的 Form2-SLA 3D 打印机制备。制备过程中使用的打印耗材为 Formlabs 公司生产的 V5 韧性光敏树脂。在制作八面体点阵结构之前，先对 V5 韧性光敏树脂进行力学性能测试。根据国标 GB/T 2567 – 2008，将 V5 韧性光敏树脂制成标准拉伸试样。根据八面体点阵结构制作要求，部分八面体点阵结构需要进行紫外固化，光敏树脂在进行力学测试时也将部分试样进行了紫外固化处理。固化处理时，将试样放入到 60 ℃的 UV 紫外固化箱中，用波长 63 nm 的紫外光固化 60 min。利用 Zwick 试验机对试样进行了拉伸测试，拉伸速度为 2 mm/min。利用式(1)和式(2)计算真应力-应变曲线，V5 韧性光敏树脂真应力-应变曲线如图 2 所示，试验结果如表 1 所示。

$$\sigma_t = \sigma_n(1+\varepsilon_n) \quad (1)$$

$$\varepsilon_t = \ln(1+\varepsilon_n) \quad (2)$$

式中：σ_t 为真应力；σ_n 为工程应力；ε_t 为真应变；ε_n 为工程应变。

表 1 V5 韧性光敏树脂固化前后力学性能测试结果

Tab. 1 Test results of mechanical properties of V5 tough resin for uncured and cured

试样状态	弹性模量/kPa	屈服强度 0.2%/MPa
非固化	225 ± 18	3.3 ± 0.3
固化	948 ± 53	16.2 ± 1.5

固化与非固化试样均测试了 3 组，根据图 2 中的曲线显示，3 组试验的结果具有良好的一致性，表明 V5 韧性树脂的力学性能分散性小。固化后的韧性树脂材料相对于未固化时，刚度约提升了 4 倍，屈服强度约提升了 5 倍。

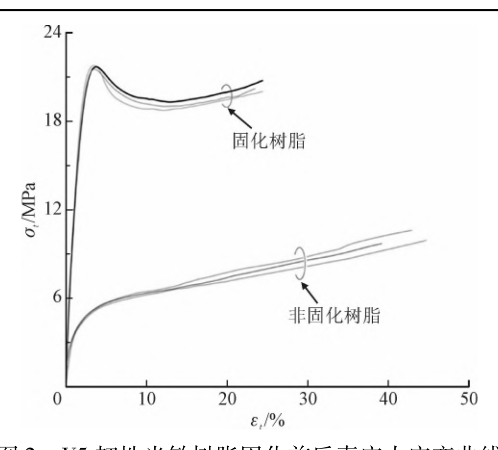


图 2　V5 韧性光敏树脂固化前后真应力应变曲线

Fig. 2　True tensile stress-strain curve of V5 tough resin for uncured and cured

1.3　八面体点阵结构试件制备

本文根据文献[2]中的式(3)计算八面体点阵结构的相对密度，并设计了 4 种相对密度分别为 11.3%、19.5%、24% 和 27.9% 的八面体点阵结构试件。试件制作过程中保证杆单元的边长 t_0 不变，通过改变杆单元长度的方式，改变试件的相对密度。

$$\bar{\rho}=6\sqrt{2}\left(\frac{t_0}{l_0}\right)^2-C\left(\frac{t_0}{l_0}\right)^3 \qquad (3)$$

式中：t_0 为杆单元的边长；l_0 为杆单元的长度。$\bar{\rho}=6\sqrt{2}(t_0/l_0)^2$ 为计算点阵结构相对密度的一阶近似结果，重复计算了结点的质量。为消除结点质量重复计算的影响，采用式(3)计算点阵结构的相对密度，并根据曲线拟合得到 $C=10.24$[2]。

利用 Form2-SLA 3D 打印机打印八面体点阵结构，打印过程可以分为如下 4 个步骤：①在 Preform 软件中输入以 4×4×4 胞元数目的八面体点阵结构模型；②通过软件生产模型的底座和支架，沿垂直方向将模型分层；③通过激光逐层扫描固化光敏树脂；④拆除试件支架和底座，并用酒精清洗试件。需要紫外固化的试件，再放入 60 ℃ 的 UV 紫固化箱中，用波长 63 nm 的紫外光固化 60 min。制作完成的八面体点阵结构如图 3 所示。

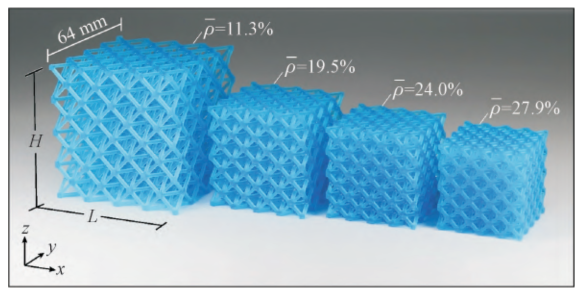


图 3　八面体点阵结构试件

Fig. 3　Octet-truss lattices

2　试验与结果分析

2.1　试验条件

利用深圳万测公司生产的 ETM305D 万能试验机对制备八面体点阵结构进行准静态压缩试验测试，利用深圳万测公司生产的 20 kN 压力传感器记录载荷，利用千分表记录位移。试验过程中保持上下平面平行，加载速度设置为 0.5 mm/min。

2.2　结果分析

固化与非固化的八面体点阵结构 4 种相对密度压缩应力-应变曲线如图 4 所示。

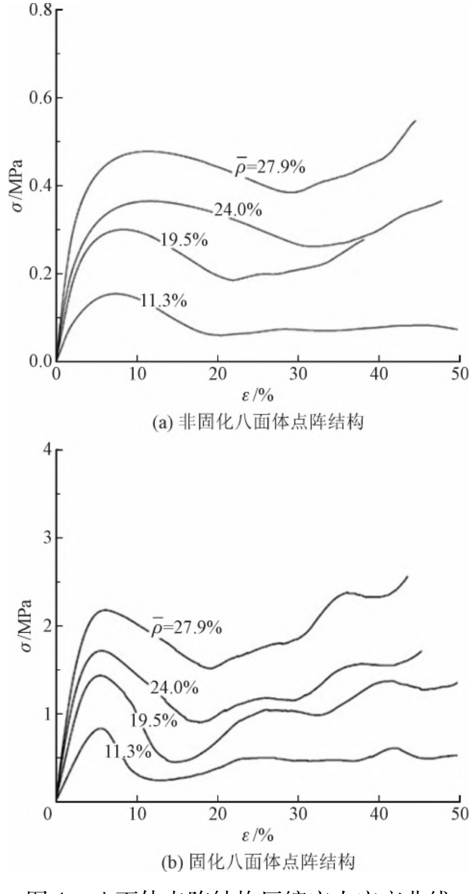


图 4　八面体点阵结构压缩应力应变曲线

Fig. 4　Compressive stress-strain curves of octet-truss lattices

根据图 4 中的应力-应变曲线，八面体点阵结构压缩过程可以分为 4 个阶段。①弹性阶段，自开始受力变形到产生 2% 左右的应变时。这一阶段可以看成弹性阶段，应力随着应变上升明显，应力应变呈线性关系；相对密度越大，应力值上升速率越大，即八面体点阵结构的弹性模量越大。②屈服阶段。八面体点阵结构开始产生塑形屈服，应力值增长缓慢，

在整个结构坍塌之前应力值达到峰值;屈服阶段在整个应力应变过程中存在阶段较短。③压溃阶段。八面体点阵结构开始坍塌,应力开始出现下降,相对密度越小,应力值下降越为明显;随着逐层的坍塌,八面体点阵结构越为密实,应力值的下降速度开始放缓,逐渐呈现应力平台,这也表明八面体点阵结构的设计具有很好的吸能性。④完全密实阶段。这一阶段八面体点阵结构已经完成了分层坍塌;八面体点阵结构被压密实,再次获得承载能力,载荷再次随着变形的增加而上升。八面体点阵结构压缩过程如图5所示。

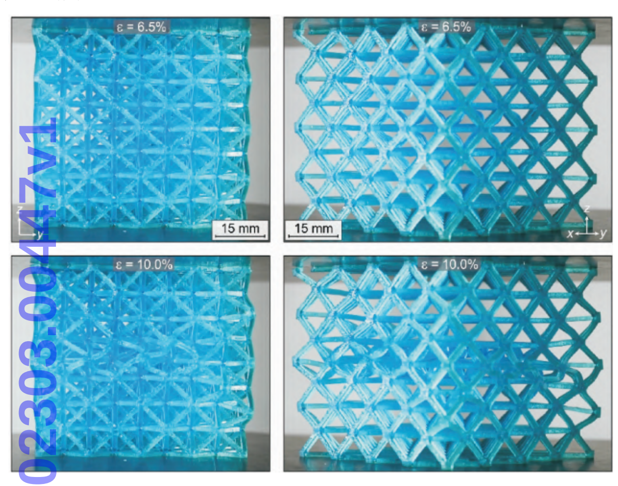


图5 八面体点阵结构压缩过程

Fig. 5 Octet-truss lattices during compression

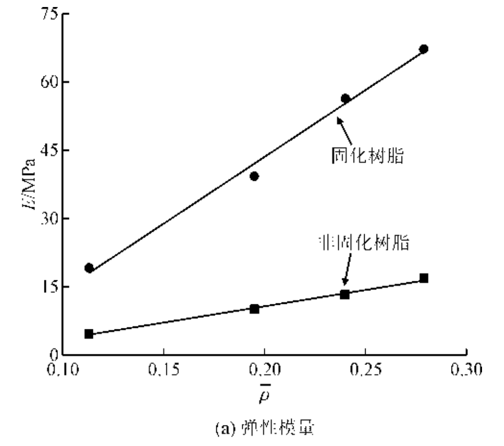
试验过程中发现所有的八面体点阵结构均表现为与相对密度为11.3%的八面体点阵结构类似的失效模式。此处仅以相对密度为11.3%的八面体点阵结构压缩过程为例描述试验过程。在应变达到6.5%时,应力达到峰值,杆件在中部区域开始发生屈曲变形,而且顶部由于应力集中的影响,杆件发生断裂。随着变形的发展,八面体点阵结构的中部区域首先发生坍塌,八面体点阵结构受泊松效应的影响,侧向膨胀明显。在应变达到10%时,中部区域基本完成坍塌,后续变形过程中,各层杆件继续大变形屈曲,各层也陆续坍塌,直至被压密实。

八面体点阵结构弹性模量及抗压强度如表2所示,弹性模量及抗压强度与相对密度关系图如图6所示。根据试验结果,随着相对密度的增加,非固化与固化的八面体点阵结构压缩模量及抗压强度均有增加,固化后的压缩模量及抗压强度上升趋势更为明显。相对密度从11.3%提升至27.9%,非固化与固化的八面体点阵结构压缩模量均上升了3.5倍左右,抗压强度约上升了3倍左右,这一结果与文献[2]预测的刚度和强度随相对密度的增加呈线性关系保持一致。在相同相对密度下,固化后的压缩模量约是非固化的压缩模量的4倍,抗压强度约是非固化的抗压强度的5倍,这一关系与前文1.2节中V5韧性树脂固化前后的比对关系保持一致。

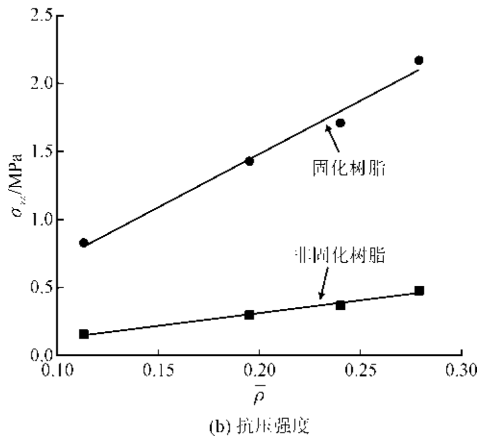
表2 八面体点阵结构压缩试验结果

Tab. 2 The compression results octet-truss lattices

相对密度/%	非固化试件		固化试件	
	压缩模量/MPa	抗压强度/MPa	压缩模量/MPa	抗压强度/MPa
11.3	4.7	0.16	19.2	0.83
19.5	10.1	0.30	39.3	1.43
24.0	13.2	0.37	56.4	1.71
27.9	16.8	0.48	67.2	2.17



(a) 弹性模量



(b) 抗压强度

图6 弹性模量和抗压强度与相对密度关系

Fig. 6 Relationship between elastic modulus compressive strength and relative density

本文定义量纲归一化刚度为$E_{zz}/(E_s\bar{\rho})$,量纲归一化强度为$\sigma_{zz}/(\sigma_s\bar{\rho})$。其中:$E_{zz}$为八面体点阵结构的$z$方向压缩模量;$E_s$为母材的压缩模量;$\sigma_{zz}$为八面体点阵结构的$z$方向抗压强度;$\sigma_s$为母材的屈服强

度;$\bar{\rho}$ 为八面体点阵结构的相对密度。量纲归一化性能的意义在于可以去掉相对密度的影响,从而不同相对密度的结构可以对比结构效率。量纲归一化刚度、量纲归一化强度与相对密度关系图如图 7 所示。可以看出:固化与非固化的量纲归一化刚度均随着相对密度增大而提高;固化后量纲归一化刚度上升趋势更为明显,固化后量纲归一化刚度的上升速率约是非固化的3 倍,在相对密度达到25% 时,固化八面体点阵结构的量纲归一化刚度达到 1;固化与非固化的量纲归一化强度也随着相对密度的增大而提高,而且二者的上升趋势较为一致,固化八面体点阵结构的量纲归一化强度均在 2 以上。

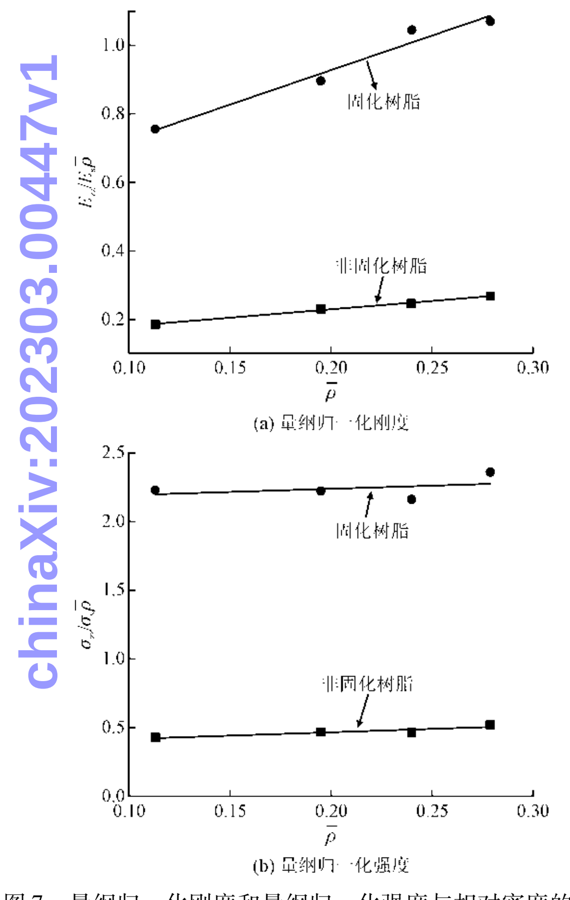


图 7 量纲归一化刚度和量纲归一化强度与相对密度的关系

Fig. 7 Relationship between compressive stiffness coefficient, compressive strength coefficient and relative density

按照式(4)计算单位体积吸收能,非固化与固化八面体点阵结构单位体积吸收能如表 3 所示,非固化与固化八面体点阵结构单位体积能量吸收与相对密度关系图如图 8 所示。

$$W_v = \int_0^{\bar{\varepsilon}} \sigma \mathrm{d}\varepsilon \quad (4)$$

式中:σ 为八面体点阵结构的压缩应力;ε 为八面体点阵结构的压缩应变,本文应变的积分上限取 0.3[2]。

表 3 八面体点阵结构单位体积吸收能

Tab. 3 Energy absorption of unit volume for octet-truss lattices

相对密度/%	单位吸收能/(J·cm^{-3})	
	非固化试件	固化试件
11.3	0.028 68	0.130 0
19.5	0.068 72	0.263 8
24.0	0.093 88	0.359 4
27.9	0.125 56	0.519 2

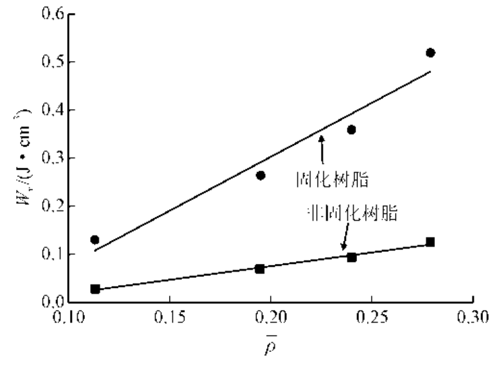


图 8 单位体积吸收能与相对密度的关系

Fig. 8 Relationship between energy absorption of unit volume with relative density

由图 8 可以看出,非固化与固化八面体点阵结构的单位吸收能均随相对密度的增大而提高;固化后的单位吸收能的上升速率明显高于非固化的八面体点阵结构,固化后单位吸收能的上升速率约是非固化的 4 倍;在相同相对密度下,固化后的单位吸收能要优于非固化的八面体点阵结构,而且随着相对密度的增大,二者的差异越明显。这是由于相对密度的提升及紫外固化提升了八面体点阵结构的弹性模量和抗压强度,同时提升了八面体点阵结构产生弹塑性变形的能力,进而表现出更好的吸能效果。

综上所述,通过 3D 打印利用 V5 韧性树脂制备的八面体点阵结构,经过紫外固化后具有比基体材料质量更轻,压缩模量、抗压强度更高,吸能效果更好的特点。未来在航空航天、车辆船舶、海洋工程等领域,固化后的 V5 韧性树脂八面体点阵结构拥有更优的使用前景。

3 结 论

1)八面体点阵结构试件压缩过程可以分为弹性阶段、塑形阶段,压溃阶段和密实阶段 4 个阶段。随着相对密度的增加,压缩模量以及抗压强度呈线性上升。相对密度从 11.3% 提升至 27.9% ,非固化与

固化试件的压缩模量均上升了 3.5 倍左右，抗压强度均上升约 3 倍左右。

2）经过紫外固化后，八面体点阵结构的压缩模量及抗压强度明显上升，在相同相对密度下，固化试件的压缩模量约是非固化的压缩模量的 4 倍，抗压强度约是非固化的抗压强度的 5 倍。

3）固化与非固化八面体点阵结构的量纲归一化刚度均随着相对密度增大而提高；固化后量纲归一化刚度上升趋势更为明显，固化后量纲归一化刚度的上升速率约是非固化的 3 倍；在相对密度超过 25% 时，固化后的量纲归一化刚度可以达到 1 以上；固化与非固化的量纲归一化强度也随着相对密度的增大而提高，而且二者的上升趋势较为一致，而且固化试件的量纲归一化强度均在 2 以上。

4）随相对密度的增大，非固化与固化的八面体点阵结构单位体积吸收能有所提高；在相同相对密度下，固化后的单位吸收能要优于非固化的八面体点阵结构，固化后单位体积吸收能的上升速率明显高于非固化的八面体点阵结构。

参考文献

[1] EVANS A G, HUTCHINSON J W, FLECK N A, et al. The topologicaldesign of multifunctional cellular metals[J]. Progress in materials science, 2001, 46(3/4): 309-327.

[2] DESHPANDE V S, FLECK N A, ASHBY M F. Effective properties of the octet-truss lattice material[J]. Journal of the mechanics and physics of solids, 2001, 49(8): 1747-1769.

[3] DESHPANDE V S, FLECK N A. Collapse of truss core sandwich beams in 3-point bending[J]. International journal of solids and structures, 2001, 38(36/37): 6275-6305.

[4] DESHPANDE V S, ASHBY M F, FLECK N A. Foam topology: bending versus stretching dominated architectures[J]. Acta materialia, 2001, 49(6): 1035-1040.

[5] WALLACH J C, GIBSON L J. Mechanical behavior of a three-dimensional truss material[J]. International journal of solids and structures, 2001, 38(40/41): 7181-7196.

[6] 王向明，苏亚东，吴斌，等. 微桁架点阵结构在飞机结构/功能一体化中的应用[J]. 航空制造技术，2018，61(10): 16-25.（WANG Xiangming, SU Yadong, WU Bin, et al. Application for additive manufacturing of lattice materials on integrated aircraft structures and functions[J]. Aeronautical manufacturing technology, 2018, 61(10): 16-25(in Chinese)).

[7] 杨亚政，杨嘉陵，曾涛，等. 轻质多孔材料研究进展[J]. 力学季刊，2007，28(4): 503-516.（YANG Yazheng, YANG Jialing, ZENG Tao, et al. Progress in research work of light materials[J]. Chinese quarterly of mechanics, 2007, 28(4): 503-516(in Chinese)).

[8] 易长炎，柏龙，陈晓红，等. 金属三维点阵结构拓扑构型研究及应用现状综述[J]. 功能材料，2017，48(10): 10055-10065.（YI Changyan, BAI Long, CHEN Xiaohong. Review on the metal three-dimensional lattice topology configurations research and application status[J]. Journal of functional materials, 2017, 48(10): 10055-10065(in Chinese)).

[9] 中华人民共和国国务院. 国务院关于印发《中国制造 2025》的通知：国发〔2015〕28 号[A/OL].（2015-05-19）[2020-07-09]. http://www.gov.cn/zhengce/content/2015-05/19/content_9784.htm.

[10] YE G Y, BI H J, HU Y C. Compression behaviors of 3D printed pyramidal lattice truss composite structures[J]. Composite structures, 2020, 233: 111706.

[11] 丁莉，满孝颖，解维华，等. 双锥构型三维点阵材料压缩特性[J]. 上海大学学报（自然科学版），2020，26(1): 76-84.（DING Li, MAN Xiaoying, XIE Weihua, et al. Compression properties of 3D dual-pyramid lattice materials[J]. Journal of Shanghai University(natural science edition), 2020, 26(1): 76-84(in Chinese)).

[12] 于天彪，赵雨，毕晓夕，等. 多孔结构对 Vero White 型光敏树脂力学性能的影响[J]. 东北大学学报（自然科学版），2019，40(6): 852-856.（YU Tianbiao, ZHAO Yu, BI Xiaoxi, et al. Effect of porous structure on mechanical properties of vero white photosensitive resin[J]. Journal of Northeastern University(natural science), 2019, 40(6): 852-856(in Chinese)).

[13] 高东明，王向东，胡晶，等. 基于 3D 打印的泡孔空间点阵对力学性能的影响[J]. 中国塑料，2017，31(5): 65-70.（GAO Dongming, WANG Xiangdong, HU Jing, et al. Effect of cell space lattice on mechanical properties of ABS based on 3D printing process[J]. China plastics, 2017, 31(5): 65-70(in Chinese)).

[14] 顾晓春，刘亚波，钱远宏，等. 含缺陷点阵结构的力学性能影响研究[J]. 失效分析与预防，2020，15(2): 91-96.（GU Xiaochun, LIU Yabo, QIAN Yuanhong, et al. Study on mechanical properties of lattice structure with defects [J]. Failure analysis and prevention, 2020, 15(2): 91-96(in Chinese)).

（编辑　黄崇亚）